NÚCLEO PROBLEMÁTICO 1: EL UNIVERSO Y LA TIERRA

Preguntas a resolver en este módulo:

1. Cuál es el origen del Universo? Cuáles son las principales teorías cosmológicas?
2. Cómo se formó la Tierra?
3. Cuál es el origen de los elementos y minerales que observamos en la Corteza Terrestre?
4. Cómo es la estructura interna de la Tierra? Cómo se determinó dicha estructura?
5. Qué es la Tectónica de Placas? Qué aplicaciones tiene en el entendimiento de la evolución de los continentes y montañas?
6. Cómo se formó la vida en el planeta?

Estrategias de Evaluación:

Un ensayo sobre la tectónica de placas – 28 de agosto de 2008
Un examen parcial – 18 de septiembre de 2008

Material recomendado:

Hambling, W. & Cristhiansen, E. (2004). Earth's Dynamic Systems. 10th Edition.
Condie, K. (1997). Plate Tectonics and Crustal Evolution.
http://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/dynamic.html
www.scotese.com
www.**palaeo**s.com/Timescale/default.htm

EL UNIVERSO

TEORIAS DE SU ORIGEN

Los trabajos de Alexander Friedman, en el año 1922, y de Georges Lemaître, de 1927, utilizaron la teoría de la relatividad para demostrar que el universo estaba en movimiento constante. Poco después, en 1929, el astrónomo estadounidense Edwin Hubble (1889-1953) descubrió galaxias más allá de la Vía Láctea que se alejaban de nosotros, como si el Universo se dilatara constantemente. En 1948, el físico ruso nacionalizado estadounidense, George Gamow (1904-1968), planteó que el universo se creó a partir de una gran explosión (Big Bang). Recientemente, ingenios espaciales puestos en órbita (COBE) han conseguido "oír" el eco de esta gigantesca explosión primigenia.

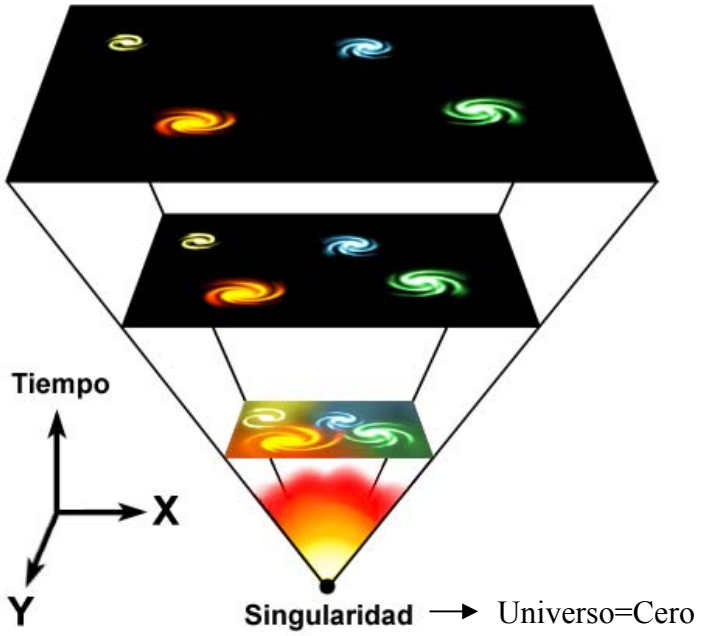

Figura 1. Modelo que representa el estado actual del Universo.

La Teoría del Big Bang

La teoría del Big Bang se desarrolló a partir de observaciones y de un avance teórico. Por medio de observaciones en los 1910, el astrónomo estadounidense Vesto Slipher y, después de él, Carl Wilhelm Wirtz, de Estrasburgo, determinaron que la mayor parte de las nebulosas espirales se alejan de la Tierra; pero no llegaron a darse cuenta de las implicaciones cosmológicas de esta observación, ni tampoco del hecho de que las supuestas nebulosas eran en realidad galaxias más allá de nuestra propia Vía Láctea.

Además, la teoría de Albert Einstein sobre la relatividad general (segunda década del siglo XX) no admite soluciones estáticas (es decir, el Universo debe estar en expansión o en reducción), resultado que él mismo consideró equivocado, por lo que trató de corregirlo agregando la constante cosmológica. El primero en aplicar formalmente la relatividad a la cosmología sin la constante cosmológica fue

Alexander Friedman, cuyas ecuaciones describen el Universo Friedman-Lemaître-Robertson-Walker, que puede expandirse o contraerse.

Entre 1927 y 1930, el padre jesuita belga Georges Lemaître obtuvo independientemente las ecuaciones Friedman - Lemaître - Robertson - Walker y propuso, sobre la base de la recesión de las nebulosas espirales, que el Universo se inició con la *explosión* de un *átomo primigenio*, lo que más tarde se denominó "Big Bang".

En 1929, Edwin Hubble realizó observaciones que sirvieron de base para comprobar la teoría de Lemaître. Hubble probó que las nebulosas espirales son galaxias y midió sus distancias observando las estrellas variables cefeidas en galaxias distantes. Descubrió que las galaxias se alejan unas de otras a velocidades (relativas a la Tierra) directamente proporcionales a su distancia. Este hecho se conoce ahora como la ley de Hubble.

Según el principio cosmológico, el alejamiento de las galaxias sugería que el Universo está en expansión. Esta idea ocasionó dos posibilidades opuestas. La primera era la teoría Big Bang de Lemaître, apoyada y desarrollada por George Gamow. La segunda posibilidad era el modelo de la teoría del estado estacionario de Fred Hoyle, según la cual se genera nueva materia mientras las galaxias se alejan entre sí. En este modelo, el Universo es básicamente el mismo en un momento dado en el tiempo. Durante muchos años hubo más o menos el mismo número de adeptos para ambas explicaciones.

Con el pasar de los años, las evidencias observacionales apoyan la idea de que el Universo evolucionó a partir de un estado denso y caliente. Desde el descubrimiento de la radiación de fondo de microondas en 1965, ésta ha sido considerada la mejor teoría para explicar el origen y evolución del cosmos. Antes de finales de los años sesenta, muchos cosmólogos pensaban que la singularidad infinitamente densa del tiempo inicial en el modelo cosmológico de Friedman era una sobreidealización, y que el Universo se contraería antes de empezar a expandirse nuevamente. Ésta es la teoría de Richard Tolman de un Universo oscilante. En los años 1960, Stephen Hawking y otros demostraron que esta idea no era factible, y que la singularidad es un componente esencial de la gravedad de Einstein. Esto llevó a la mayoría de los cosmólogos a aceptar la **teoría del Big Bang**, según la cual el Universo que observamos se inició hace un tiempo finito.

Prácticamente todos los trabajos teóricos actuales en cosmología tratan de extender o refinar elementos de la teoría del Big Bang. Mucho del trabajo actual en cosmología incluye entender cómo se formaron las galaxias en el contexto del Big Bang, entender lo que allí ocurrió y cotejar nuevas observaciones con la teoría básica.

A finales de los años 1990 y a principios del siglo XXI se lograron enormes avances en la cosmología del Big Bang como resultado de importantes avances en telescopía, en combinación con grandes cantidades de datos satelitales de COBE, el telescopio espacial Hubble y WMAP. Estos datos han permitido a los cosmólogos calcular muchos de los parámetros del Big Bang hasta un nuevo nivel de precisión, y han conducido al descubrimiento inesperado de que el Universo está en aceleración.

Michio Kaku ha señalado cierta paradoja en la denominación *big bang* (gran explosión): en cierto modo no puede haber sido grande ya que se produjo exactamente antes del surgimiento del espacio-tiempo, habría sido el mismo big

bang lo que habría generado la dimensiones desde una singularidad; tampoco es exactamente una explosión en el sentido propio del término ya que no se propagó fuera de sí mismo.

Basándose en medidas de la expansión del Universo utilizando observaciones de las supernovas tipo 1a, en función de la variación de la temperatura en diferentes escalas en la radiación de fondo de microondas y en función de la correlación de las galaxias, la edad del Universo es de aproximadamente 13,7 ± 0,2 miles de millones de años. Es notable el hecho de que tres mediciones independientes sean consistentes, por lo que se consideran una fuerte evidencia del llamado modelo de concordancia que describe la naturaleza detallada del Universo.

El universo en sus primeros momentos estaba lleno homogénea e isótropamente de una energía muy densa y tenía una temperatura y presión concomitantes. Se expandió y se enfrió, experimentando cambios de fase análogos a la condensación del vapor o a la congelación del agua, pero relacionados con las partículas elementales.

Aproximadamente 10^{-35} segundos después de la época de Planck un cambio de fase causó que el Universo se expandiese de forma exponencial durante un período llamado inflación cósmica. Al terminar la inflación, los componentes materiales del Universo quedaron en la forma de un plasma de quarks-gluones, en donde todas las partes que lo formaban estaban en movimiento en forma relativista. Con el crecimiento en tamaño del Universo, la temperatura descendió. A cierta temperatura, y debido a un cambio aún desconocido denominado bariogénesis, los quarks y los gluones se combinaron en bariones tales como el protón y el neutrón, produciendo de alguna manera la asimetría observada actualmente entre la materia y la antimateria. Las temperaturas aún más bajas condujeron a nuevos cambios de fase, que rompieron la simetría, así que les dieron su forma actual a las fuerzas fundamentales de la física y a las partículas elementales. Más tarde, protones y neutrones se combinaron para formar los núcleos de deuterio y de helio, en un proceso llamado nucleosíntesis primordial. Al enfriarse el Universo, la materia gradualmente dejó de moverse de forma relativista y su densidad de energía comenzó a dominar gravitacionalmente sobre la radiación. Pasados 300.000 años, los electrones y los núcleos se combinaron para formar los átomos (mayoritariamente de hidrógeno). Por eso, la radiación se desacopló de los átomos y continuó por el espacio prácticamente sin obstáculos. Ésta es la radiación de fondo de microondas.

Al pasar el tiempo, algunas regiones ligeramente más densas de la materia casi uniformemente distribuida crecieron gravitacionalmente, haciéndose más densas, formando nubes, estrellas, galaxias y el resto de las estructuras astronómicas que actualmente se observan. Los detalles de este proceso dependen de la cantidad y tipo de materia que hay en el Universo. Los tres tipos posibles se denominan materia oscura fría, materia oscura caliente y materia bariónica. Las mejores medidas disponibles (provenientes del WMAP) muestran que la forma más común de materia en el universo es la materia oscura fría. Los otros dos tipos de materia sólo representarían el 20 por ciento de la materia del Universo.

El Universo actual parece estar dominado por una forma misteriosa de energía conocida como energía oscura. Aproximadamente el 70 por ciento de la densidad de energía del universo actual está en esa forma. Una de las propiedades características de este componente del universo es el hecho de que provoca que la expansión del universo varíe de una relación lineal entre velocidad y distancia,

haciendo que el espacio-tiempo se expanda más rápidamente que lo esperado a grandes distancias. La energía oscura toma la forma de una constante cosmológica en las ecuaciones de campo de Einstein de la relatividad general, pero los detalles de esta ecuación de estado y su relación con el modelo estándar de la física de partículas continúan siendo investigados tanto en el ámbito de la física teórica como por medio de observaciones.

Visto así, el Big Bang no es una explosión de materia que se aleja para llenar un universo vacío; es el espacio-tiempo el que se extiende. Y es su expansión la que causa el incremento de la distancia física entre dos puntos fijos en nuestro universo. Cuando los objetos están ligados entre ellos (por ejemplo, por una galaxia), no se alejan con la expansión del espacio-tiempo, debido a que se asume que las leyes de la física que los gobiernan son uniformes e independientes del espacio métrico. Más aún, la expansión del universo en las escalas actuales locales es tan pequeño que cualquier dependencia de las leyes de la física en la expansión no sería medible con las técnicas actuales.

***Evidencias del Big Bang*:**

En general, se consideran tres las evidencias empíricas que apoyan la teoría cosmológica del Big Bang. Éstas son: la expansión del universo que se expresa en la Ley de Hubble y que se puede apreciar en el corrimiento hacia el rojo de las galaxias, las medidas detalladas del fondo cósmico de microondas, y la abundancia de elementos ligeros. Además, la función de correlación de la estructura a gran escala en el universo encaja con la teoría del Big Bang.

La ley de Hubble: De la observación de galaxias y quasares lejanos se desprende la idea de que estos objetos experimentan un corrimiento hacia el rojo, lo que quiere decir que la luz que emiten se ha desplazado proporcionalmente hacia longitudes de onda más largas. Esto se comprueba tomando el espectro de los objetos y comparando, después, el patrón espectroscópico de las líneas de emisión o absorción correspondientes a átomos de los elementos que interactúan con la radiación. En este análisis se puede apreciar cierto corrimiento hacia el rojo, lo que se explica por una velocidad recesional correspondiente al efecto Doppler en la radiación. Al representar estas velocidades recesionales frente a las distancias respecto a los objetos, se observa que guardan una relación lineal, conocida como Ley de Hubble:

$$v = H_0 \cdot D$$

donde v es la velocidad recesional, D es la distancia al objeto y H_0 es la constante de Hubble, que el satélite WMAP estimó en 71 ± 4 km/s/Mpc.

Fondo cósmico de microondas: Una de las características de la teoría del Big Bang es la predicción de la radiación de fondo de microondas o CMB (Cosmic microwave background). El universo temprano, debido a su alta temperatura, se habría llenado de luz emitida por sus otros componentes. Mientras el universo se enfriaba debido a la expansión, su temperatura habría caído por debajo de 3.000 K. Por encima de esta temperatura, los electrones y protones están separados, haciendo el universo opaco a la luz. Por debajo de los 3.000 K se forman los átomos, permitiendo el paso de la luz a través del gas del universo. Esto es lo que se conoce como disociación de fotones.

La radiación en este momento habría tenido el espectro del cuerpo negro y habría viajado libremente durante el resto de vida del universo, sufriendo un corrimiento

hacia el rojo como consecuencia de la expansión de Hubble. Esto hace variar el espectro del cuerpo negro de 3.000 K a un espectro del cuerpo negro con una temperatura mucho menor. La radiación, vista desde cualquier punto del universo, parecerá provenir de todas las direcciones en el espacio.

En 1965, Arno Penzias y Robert Wilson, mientras desarrollaban una serie de observaciones de diagnóstico con un receptor de microondas propiedad de los Laboratorios Bell, descubrieron el fondo cósmico de microondas. Su descubrimiento proporcionó una confirmación sustancial de las predicciones generales respecto al CMB —la radiación resultó ser isótropa y constante, con un espectro del cuerpo negro de cerca de 3 K— e inclinó la balanza hacia la hipótesis del Big Bang. Penzias y Wilson recibieron el Premio Nobel por su descubrimiento.

En 1989, la NASA lanzó el COBE (Cosmic background Explorer, y los resultados iniciales, proporcionados en 1990, fueron consistentes con las predicciones generales de la teoría del Big Bang acerca de la CMB. El COBE halló una temperatura residual de 2.726 K, y determinó que el CMB era isótropo en torno a una de cada 10^5 partes. Durante la década de los 90 se investigó más extensamente la anisotropía en el CMB mediante un gran número de experimentos en tierra y, midiendo la distancia angular media (la distancia en el cielo) de las anisotropías, se vio que el universo era geométricamente plano.

A principios de 2003 se dieron a conocer los resultados de la Sonda Wilkinson de Anisotropías del fondo de Microondas (en inglés *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* o *WMAP*), mejorando los que hasta entonces eran los valores más precisos de algunos parámetros cosmológicos. *(Véase también experimentos sobre el fondo cósmico de microondas)*. Este satélite también refutó varios modelos inflacionistas específicos, pero los resultados eran constantes con la teoría de la inflación en general.

Abundancia de elementos primordiales: Se puede calcular, usando la teoría del Big Bang, la concentración de en el universo como proporciones con respecto a la cantidad de hidrógeno normal, H. Todas las abundancias dependen de un solo parámetro: la razón entre fotones y bariones. La proporción predicha es de cerca de 0,25 para, alrededor de $^2H/H$, alrededor de 10^{-4} para $^3He/H$.

Estas abundancias medidas concuerdan con las predichas a partir de un único valor de la razón barión frente a fotón, y se considera una fuerte evidencia en favor del Big Bang, ya que esta teoría es la única explicación conocida para la abundancia relativa de elementos ligeros. De hecho no hay, fuera de la teoría del Big Bang, ninguna otra razón obvia por la que el universo debiera, por ejemplo, tener más.

Evolución y distribución galáctica: Las observaciones detalladas de la morfología y estructura de las galaxias y cuasares proporcionan una fuerte evidencia del Big Bang. La combinación de las observaciones con la teoría sugiere que los primeros cuasares y galaxias se formaron hace alrededor de mil millones de años después del Big Bang, y desde ese momento se han estado formando estructuras más grandes, como los cúmulos de galaxias y los supercúmulos. Las poblaciones de estrellas han ido envejeciendo y evolucionando, de modo que las galaxias lejanas (que se observan tal y como eran en el principio del universo) son muy diferentes a las galaxias cercanas (que se observan en un estado más reciente). Por otro lado, las galaxias formadas hace relativamente poco son muy diferentes a las galaxias que se formaron a distancias similares pero poco después del Big Bang. Estas observaciones son argumentos sólidos en contra de la teoría del estado

estacionario. Las observaciones de la formación estelar, la distribución de cuasares y galaxias, y las estructuras más grandes concuerdan con las simulaciones obtenidas sobre la formación de la estructura en el universo a partir del Big Bang, y están ayudando a completar detalles de la teoría.

Los choques y un cierto desorden hicieron que la materia se agrupara y se concentrase más en algunos lugares del espacio, y se formaron las primeras estrellas y las primeras galaxias. Desde entonces, el Universo continúa en constante movimiento y evolución.

No se puede imaginar el Big Bang como la explosión de un punto de materia en el vacío, porque en este punto se concentraban toda la materia, la energía, el espacio y el tiempo. No había ni "fuera" ni "antes". El espacio y el tiempo también se expanden con el Universo.

La teoría de la Inflación Cósmica

La inflación fue propuesta en 1981 por Alan Guth, donde dice que el universo naciente pasó por una fase de expansión exponencial, que fue producida por una densidad de energía del vacío de presión negativa. Como consecuencia directa de esta expansión, todo el universo observable podría haberse originado en una región pequeña, conectada causalmente. La inflación contesta a los interrogantes clásicos de la cosmología del Big Bang: por qué el Universo parece ser plano, homogéneo e isótropo de acuerdo con el principio cosmológico como se esperaría, y basándose en la física del Big Bang, un Universo altamente curvado y heterogéneo. La inflación también explica el origen de la estructura a gran escala del universo. Las fluctuaciones cuánticas en la región microscópica inflacionaria, magnificada a tamaño cósmico, podrían entonces ser las semillas para el crecimiento de estructuras en el universo.

Guth propuso que según se enfriaba el Universo temprano, fue atrapado en un falso vacío con una densidad de energía alta, que se parece a una constante cosmológica. Según el Universo primigenio se enfriaba se vio atrapado en un estado metaestable (estaba superenfriado) que podía sólo decaer a través del proceso de nucleación de pompas vía el efecto de túnel cuántico. Las burbujas del vacío verdadero se forman espontáneamente en el mar de falso vacío y rápidamente empieza a expandirse a la velocidad de la luz. Guth reconoció que este modelo era problemático porque el nodelo no recalentaba apropiadamente: cuando las burbujas nucleaban, no generaban ninguna radiación. La radiación sólo podía ser generada en colisiones entre muros de burbujas. Pero si la inflación duró lo suficiente como para solucionar los problemas de las condiciones iniciales, las colisiones entre las burbujas llegaron a ser excesivamente raras. (Incluso aunque las burbujas se expandan a la velocidad de la luz, las burbujas están lejos de que la expansión del espacio esté causando que la distancia entre ellos se expanda mucho más deprisa).

Aunque el mecanismo responsable detallado de la física de partículas para la inflación se desconoce, la imagen básica proporciona un número de predicciones que se han confirmado por pruebas observacionales. La inflación es actualmente condiderada como parte del estándar Big Bang cosmológico caliente. La partícula elemental o campo hipotético que se piensa que es responsable de la inflación es llamada **inflatón**.

La inflación sugiere que hubo un periodo de expansión exponencial en el Universo muy pre-primigenio. La expansión es exponencial porque la distancia entre dos

observadores fijos se incrementa exponencialmente, debido a la métrica de expansión del Universo (un espacio-tiempo con esta propiedad es llamado un espacio de Sitter). Las condiciones físicas desde un momento hasta el siguiente son estables: la tasa de expansión, llamado la constante de Hubble, es casi constante, lo que lleva a altos niveles de simetría. La inflación es a menudo conocida como un periodo de *expansión acelerada* porque la distancia entre dos observadores fijos se incrementa a una tasa acelerante cuando se mueven alejándose. (Sin embargo, esto no significa que el parámetro de Hubble se esté incrementando, ver parámetro de deceleración).

La inflación cósmica tiene el efecto importante de resolver heterogeneidades, anisotropía y la curvatura del espacio. Esto pone al Universo en un estado muy simple, en el que está completamente dominado por el campo inflatón y las únicas heterogeneidades significativas son las débiles fluctuaciones cuánticas en el inflatón. La inflación también dilute partículas pesadas exóticas, como los monopolos magnéticos predichos por muchas extensiones del modelo estándar de física de partículas. Si el Universo estuviese lo suficientemente caliente como para formar tales partículas *anteriores* al periodo de inflación, no serían observados en la Naturaleza, ya que serían tan raras que es bastante probable que no haya ninguna en el Universo observable. Juntos, estos efectos se llamar el "teorema de no-pelo inflacionario"[5] por analogía con el teorema de no-pelo para los agujeros negros.

Un requisito clave es que la inflación tiene que continuar lo suficiente para producir el Universo observable actual de un simple, pequeño volumen de Hubble inflacionario. Esto es necesario para asegurar que el Universo parece plano, homogéneo e isótropo en las escalas observables mayores. Este requisito está generalmente pensado para satisfacerse su el Universo se expandió con un factor de al menos 10^{26} durante la inflación. Al final de la inflación, ocurre un proceso llamado *recalentamiento*, en el que las partículas inflatón decaen en la radiación que empieza el caliente Big Bang. No se conoce cuando duró la inflación, pero normalmente se piensa que fue extremadamente corta comparado con la edad del Universo. Asumiendo que la escala de energía de inflación está entre 10^{15} y 10^{16} eV, como se sugiere en los modelos más simples, el periodo de inflación responsable del Universo observable probablemente duró unos 10^{-33} segundos.

La teoría del Universo Oscilante

El universo oscilante es una hipótesis propuesta por Richardsom Tolmanansom, según la cual, el universo sufre una serie infinita de oscilaciones, cada una de ellas iniciándose con un Big Bang y terminando con un Big Crunch. Luego del Big Bang, el universo se expande por un tiempo antes de que la atracción gravitacional de la materia produzca un acercamiento hasta llegar a un colapso y sufrir seguidamente un Gran Rebote.

Esta hipótesis fue bastante aceptada durante un tiempo por los cosmólogos que pensaban que alguna fuerza debería impedir la formación de singularidades gravitacionales y conecta el big bang con un anterior big crunch: las singularidades matemáticas que aparecían en los cálculos eran el resultado de sobre idealización matemática y serían resueltas por un tratamiento más cuidadoso. Sin embargo, en los años 1960, Stephen Hawking, Roger Penrose y George Ellis mostraron que las singularidades son una característica universal de las cosmologías que incluyen el big bang sin que puedan ser evitadas con ninguno de los elementos de la relatividad general. Teóricamente, el universo oscilante no se compagina con la segunda ley de la termodinámica: la entropía aumentaría en cada oscilación de manera que no se

regresaría a las condiciones anteriores. Otras medidas sugieren también que el universo no es cerrado. Estos argumentos hicieron que los cosmólogos abandonaran el modelo de universo oscilante.

La teoría ha vuelto a resurgir en la cosmología de brane como un modelo cíclico, que logra evadir todos los argumentos que hicieron desechar la teoría del universo oscilante en los años 1960. Esta teoría es altamente controvertida debido a la ausencia de una descripción satisfactoria en este modelo del rebote con la teoría de cuerdas.

La Teoría de cuerdas necesita que, además de las tres dimensiones que observamos, existen dimensiones adicionales que están atrofiadas (véase también teoría de Kaluza-Klein). Las dimensiones extra aparecen como componentes frecuentes de los modelos de supergravedad y otras alternativas a la gravedad cuántica. Esto provoca la pregunta: ¿por qué las cuatro dimensiones del espacio-tiempo se vuelven grandes y el resto se vuelve inobservablemente pequeñas? Un intento de abordar esta pregunta, llamada cosmología de las cuerdas gaseosas, fue propuesta por Robert Brandenberger y Cumrun Vafa.[74] Este modelo se centra en la dinámica del Universo primigenio considerada como un gas caliente de cuerdas. Brandenberger y Vafa demostraron que una dimensión de espacio-tiempo sólo se podía expandir si las cuerdas enrolladas se podían anhiquilar eficientemente las unas con las otras. Cada cuerda es un objeto unidimensional y los números de dimensiones más grandes en que dos cuerdas se cruzarán genéricamente (y presumiblemente se aniquilará) es tres. Por tanto, se discute que el número más probable de grandes dimensiones espaciales no-compactas es tres. Los trabajos actuales en este modelo se centran en si puede tener éxito en estabilizar el tamaño de las dimensiones atrofiadas y producir el espectro correcto de la densidad de perbaciones primordiales. Desde un punto de vista reviente.

Etapas de la Evolución	
Big Bang	Densidad infinita, volumen cero.
10^{-43} segs.	Fuerzas no diferenciadas
10^{-34} segs.	Sopa de partículas elementales
10^{-10} segs.	Se forman protones y neutrones
1 seg.	10.000.000.000 º. Tamaño Sol
3 minutos	1.000.000.000 º. Nucleos
30 minutos	300.000.000 º. Plasma
300.000 años	Átomos. Universo transparente
10^{6} años	Gérmenes de galaxias
10^{8} años	Primeras galaxias
10^{9} años	Estrellas. El resto, se enfría.
$5x10^{9}$ años	Formación de la Vía Láctea
$4.6x10^{9}$ años	Sistema Solar y Tierra

Tabla 1. Etapas de la Evolución del Universo, según la teoría del Big Bang.

LA TIERRA

EL ORIGEN DE LA TIERRA Y EL SISTEMA SOLAR

La Tierra se formó hace 4600 millones de años aproximadamente. Esta es la edad estimada de nuestro sol y por ende, del sistema solar. El Sistema Solar se formó por la coagulación y contracción gravitacional de una nube de polvo y gas alrededor del sol. Las partículas alrededor del sol fueron formando pequeños planetas, y las continuas colisiones sumadas al calor producido por las fusiones nucleares fueron dando origen a los planetas que conocemos en la actualidad. La Luna se formó 45 Ma después de los planetas internos debido a una colisión de la Tierra con un gran planetoide conocido como Theia.
Inicialmente la Tierra era una masa fundida en su totalidad. Poco a poco los elementos más pesados como el Hierro fueron concentrándose en el núcleo, y los elementos más livianos fueron ascendiendo hacia las partes más superiores de esta bola incandescente formando una especie de nata. En contacto con el espacio exterior y una vez cesó la intensa colisión de asteroides, estos elementos fueron formando una especie de costra que dio origen a la corteza terrestre. La continua actividad volcánica formaba más y más material que engrosaba la corteza. Las moléculas volátiles como el agua, el metano, el amonio, el hidrógeno, el oxígeno y el dióxido de carbono fueron separándose hacia las partes más altas, y junto a las moléculas de agua generadas por los cometas y los minerales hidratados se generó una atmósfera de vapor alrededor de la corteza. La lluvia empezó a formar los océanos hace 4400-4300 Ma. Las rocas terrestres más antiguas se conocen en Australia, con una edad superior a los 3800 Ma (un zircón datado en esta roca dio una edad de 4400 +-0.8 Ma).

ESTRUCTURA INTERNA DE LA TIERRA

El interior del planeta, está dividido en capas. La Tierra tiene una corteza externa de silicatos solidificados, un manto viscoso, y un núcleo con otras dos capas, una externa semisólida, mucho menos viscosa que el manto y una interna sólida. Muchas de las rocas que hoy forman parte de la corteza se formaron hace menos de 100 millones de años. Sin embargo, las formaciones minerales más antiguas conocidas tienen 4400 millones de años, lo que nos indica que, al menos, el planeta ha tenido una corteza sólida desde entonces.

La división de la tierra en capas ha sido determinada indirectamente utilizando el tiempo que tardan en viajar las ondas sísmicas reflejadas y refractadas, creadas por terremotos. Debe tenerse en cuenta que las excavaciones más profundas (algunas minas de Africa del Sur) solo alcanzan 3 Km. de profundidad y las mayores perforaciones para explotación de petróleo no llegan a los 11 Kilómetros. Si recordamos que el radio terrestre ronda los 6.370 Km. vemos que la información directa es, en proporción, muy pequeña.

La geofísica nos provee información a través del estudio de las ondas sísmicas. Estas ondas se desplazan con distinta velocidad según la densidad del medio que atraviesan. Durante un sismo, se generan a partir del foco dos tipos de ondas: Las ondas P, que vibran en sentido paralelo a la dirección de propagación, son más rápidas y se transmiten tanto en medios sólidos como líquidos. Las ondas S son transversales y sólo se propagan a través de medios sólidos, es por este motivo que no llegan al núcleo, ya que el manto presenta una capa fluida.

Los límites entre cada capa de la Tierra están determinados por discontinuidades Geofísicas, que se producen por cambios en la mineralogía o en las propiedades físicas de las rocas, y se registran por cambios abruptos en las velocidades de las ondas P y S. Las discontinuidades más conocidas son La Discontinuidad de Mohorovicic, que separa la corteza del manto, La Discontinuidad de Gutenberg, que separa el Manto del Núcleo Superior, y la de Lehmann o Wiechert, que separa el núcleo externo del interno (Ver Figura 2).

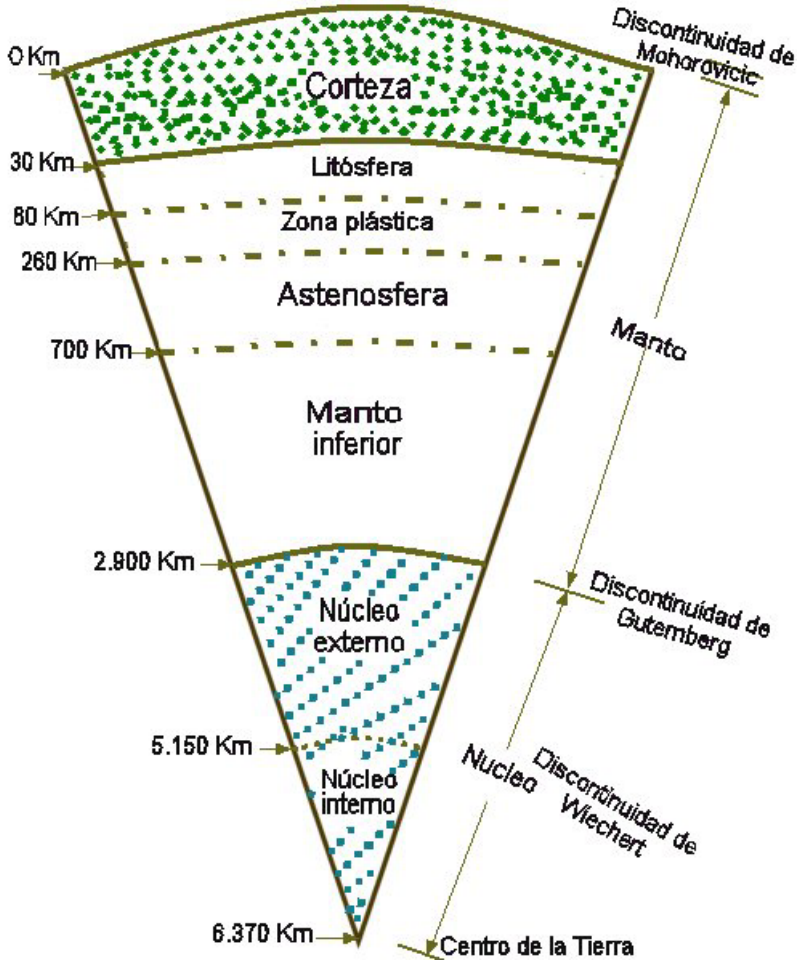

Figura 2. Vista esquemática del interior de la Tierra.

En el primer límite (Mohorovicic) que, obviamente no es una superficie regular, se produce un brusco aumento de la velocidad de las ondas "P".

A los 2.900 Km. (Gutenberg) la propagación de las "P" sufren un descenso notable y las ondas "S" no se propagan.

En la actualidad existen estudios más detallados que muestran otras divisiones, como el área de baja velocidad ubicada entre los 60 y 250 Km. de profundidad, que se interpreta como una zona de alta plasticidad de los materiales del manto y la discontinuidad de Wiechert que se manifiesta a los 5.150 Km. y parece diferenciar al núcleo en dos partes concéntricas.

Profundidad		Capa
Kilómetros	**Millas**	
0–60	0–37	Litosfera (varía localmente entre 5 y 200 km)
0–35	0–22	... Corteza (varía localmente entre 5 y 70 km)
35–60	22–37	... Parte superior del manto
35–2890	22–1790	Manto
35–660		Manto superior
100–200	62–125	... Astenosfera
660–2890	–1790	Manto inferior (Mesosfera)
2890–5100	1790–3160	Núcleo externo
	3160–3954	
5100–6378		Núcleo interno

Tabla 2. Profundidades a la cual se ubican las diferentes capas de la Tierra.

El Núcleo

La densidad media de la Tierra es 5515 kg/m3. Esta cifra lo convierte en el planeta más denso del sistema solar. Si consideramos que la densidad media de la corteza es aproximadamente 3000 kg/m3, debemos asumir que en el núcleo terrestre debe estar compuesto de materiales más densos. Los estudios sismológicos han aportado más evidencias sobre la densidad del núcleo. En sus primeras fases, hace unos 4,500 millones (4.5×109) de años, los materiales más densos, derretidos, se habrían hundido hacia el núcleo en un proceso llamado diferenciación planetaria, mientras que otros menos densos habrían migrado hacia la corteza. Como resultado de este proceso, el núcleo está compuesto ampliamente de hierro (Fe)(80%), junto con níquel (Ni) y varios elementos más ligeros. Otros elementos más densos, como el plomo (Pb) o el uranio (U) son muy raros, o permanecieron en la superficie unidos a otros elementos más ligeros (ver materiales félsicos) Diversas mediciones sísmicas muestran que el núcleo está compuesto de dos partes, una interna sólida de 1220 km de radio y una capa externa, semisólida que llega hasta los 3400 km. El núcleo interno sólido fue descubierto en 1936 por Inge Lehmann y se cree de forma más o menos unánime que está compuesto de Hierro (Fe) con algo de Níquel (Ni). Algunos científicos creen que el núcleo interno podría estar en forma de un cristal de hierro. El núcleo externo rodea al interno y se cree que está compuesto por una mezcla de Hierro (Fe), Niquel (Ni) y otros elementos más ligeros. Recientes propuestas sugieren que la parte más interna del núcleo podría estar enriquecida con elementos muy pesados, con mayor número atómico que el cesio (Cs)(trans-Cesio, elementos con número atómico mayor de 55). Esto incluiría Oro (Au), Mercurio (Hg) y Uranio (U). Es generalmente aceptado que los movimientos de convección en el núcleo externo, combinados con el movimiento provocado por la rotación terrestre (ver efecto Coriolis), son responsables del campo magnético terrestre, mediante un proceso descrito por la Teoría de la dinamo. El núcleo interno está demasiado caliente para mantener un campo magnético permanente (ver Temperatura de Curie) pero probablemente estabilice el creado por el núcleo externo. Pruebas recientes sugieren que el núcleo interno podría rotar ligeramente más rápido que el resto del planeta. En Agosto de 2005 un grupo de geofísicos publicaron, en la revista Science, que, de acuerdo con sus cálculos, el núcleo interno rota aproximadamente entre 0.3 y 0.5 grados más al año que la corteza. Las últimas teorías científicas explican el gradiente de temperatura de la Tierra como una combinación del calor

remanente de la formación del planeta, calor producido por la desintegración de elementos radiactivos y el enfriamiento del núcleo interno.

El Manto

El manto terrestre se extiende hasta una profundidad de 2890 km, lo que le convierte en la capa más grande del planeta. La presión, en la parte inferior del manto, es de ~140 G Pa (1.4 M atm). El manto está compuesto por rocas silíceas, más ricas en hierro y magnesio que la corteza. Las grandes temperaturas hacen que los materiales silícios sean lo suficientemente dúctiles como para fluir, aunque en escalas temporales muy grandes. La convección del manto es responsable en la superficie del movimiento de las placas tectónicas. Como el punto de fusión y la viscosidad de una sustancia dependen de la presión a la que esté sometida, la parte inferior del manto se mueve con mayor dificultad que el manto superior, aunque también los cambios químicos pueden tener importancia en este fenómeno. La viscosidad del manto varía entre 1021 y 1024 Pa·s. Como comparación, la viscosidad del agua es aproximadamente 10-3 Pa.s, lo que ilustra la lentitud con la que se mueve el manto.

¿Por qué es sólido el núcleo interno, líquido el externo, y semisólido el manto? La respuesta depende tanto de los puntos de fusión de las diferentes capas (núcleo de hierro-níquel, manto, y corteza de silicatos) como del incremento de la temperatura y presión conforme nos movemos hacia el centro de la Tierra. En la superficie, tanto las aleaciones de hierro-níquel como los silicatos están suficientemente fríos como para ser sólidos. En el manto superior, los silicatos son normalmente sólidos (aunque hay puntos locales donde están derretidos), pero como están bajo condiciones de alta temperatura y relativamente poca presión, las rocas en el manto superior tienen una viscosidad relativamente baja. En contraste, el manto inferior está sometido a una presión, lo que hace que tenga una mayor viscosidad en comparación con el manto superior. El núcleo externo, formado por hierro y níquel, es líquido a pesar de la presión porque tiene un punto de fusión menor que los silicatos del manto. El núcleo interno, por su parte, es sólido debido a la enorme presión que hay en el centro del planeta.

La Corteza

La corteza terrestre tiene entre 5 y 70 km de grosor. Donde la tierra se encuentra hundida y cubierta por la hidrosfera es llamda corteza oceánica, compuesta por densas rocas máficas de silicatos de hierro y magnesio, y que se encuentra en las cuencas oceánicas.Es llamada corteza continental a zonas en donde emerge la tierra , que es menos densa y se compone de rocas félsicas de silicatos de sodio, potasio y aluminio. La frontera entre corteza y manto se manifiesta en dos fenómenos físicos. En primer lugar, hay una discontinuidad en la velocidad sísmica, que se conoce como la "Discontinuidad de Mohorovicic", o Moho. Se cree que este fenómeno es debido a un cambio en la composición de las rocas, de unas que contienen feldespatos plagioclásicos (situadas en la parte superior) a otras que no poseen feldespatos (en la parte inferior). En segundo lugar, existe una discontinuidad química entre cúmulos ultramáficos y las Hanzburguitas tectonizadas, que se ha observado en partes profundas de la corteza oceánica que han sido obducidas dentro de la corteza continental y conservadas como secuencias ofiolíticas.

COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA TIERRA Y LOS PROCESOS DE DIFERENCIACIÓN

Tomando la teoría de la gran nube de gas como punto inicial y, si aceptamos una edad aproximada de la tierra de 4.600 millones de años, podemos hablar de una era pregeológica y una era geológica.

La era pregeológica, algo así como una transición de masa gaseosa a cuerpo sólido que duró 1200 millones de años, produjo las primeras reacciones químicas y lo que llamamos el protoplaneta.

La era geológica se inicia a partir de la existencia de un cuerpo celeste definido en cuya corteza diferenciamos rocas y agua.

Aquí comenzamos a salir de lo estrictamente teórico al poder fechar en 3.800 millones de años la roca más antigua.

En cuanto a la atmósfera, estudios comparativos, describen a una primitiva capa circundante compuesta mayoritariamente por hidrógeno, helio, amoníaco y metano.
El Hidrógeno, muy abundante, ya formaba compuestos con el nitrógeno y el carbono.Posteriormente, la gran temperatura de contracción del protoplaneta hizo emigrar a los gases más inestables, el helio y el hidrógeno, para dejar a los residuales, oxigeno y nitrógeno, como dominantes. A partir de este momento el oxígeno desarrolla un rol fundamental, ya que al reaccionar con el silicio, magnesio, calcio y algunos otros forma los silicatos que son los componentes mayoritarios de las rocas. También es importante la aparición del Hierro, y de los metales en general, que constituyen gran parte de la masa interna del planeta y de los sulfuros y óxidos de la superficie.

En cuanto a la hidrósfera, si bien se infiere una combinación del oxígeno con el hidrógeno libre, no se descarta un origen intratelúrico, es decir agua con abundante contenido de sales proveniente del interior de la tierra.

Estos son solo algunos de los procesos iniciales que intentan dar un bosquejo de la formación y evolución química de la atmósfera, hidrósfera y la litosfera terrestre. A continuación veremos un poco más de estas capas:

La Litosfera

La litosfera es la capa externa de la Tierra y está formada por materiales sólidos, engloba la corteza continental, de entre 20 y 70 Km. de espesor, y la corteza oceánica o parte superficial del manto consolidado, de unos 10 Km. de espesor. Se presenta dividida en placas tectónicas que se desplazan lentamente sobre la astenosfera, capa de material fluido que se encuentra sobre el manto superior.

Las tierras emergidas son las que se hallan situadas sobre el nivel del mar y ocupan el 29% de la superficie del planeta. Su distribución es muy irregular, concentrándose principalmente en el Hemisferio Norte o continental, dominando los océanos en el Hemisferio Sur o marítimo.

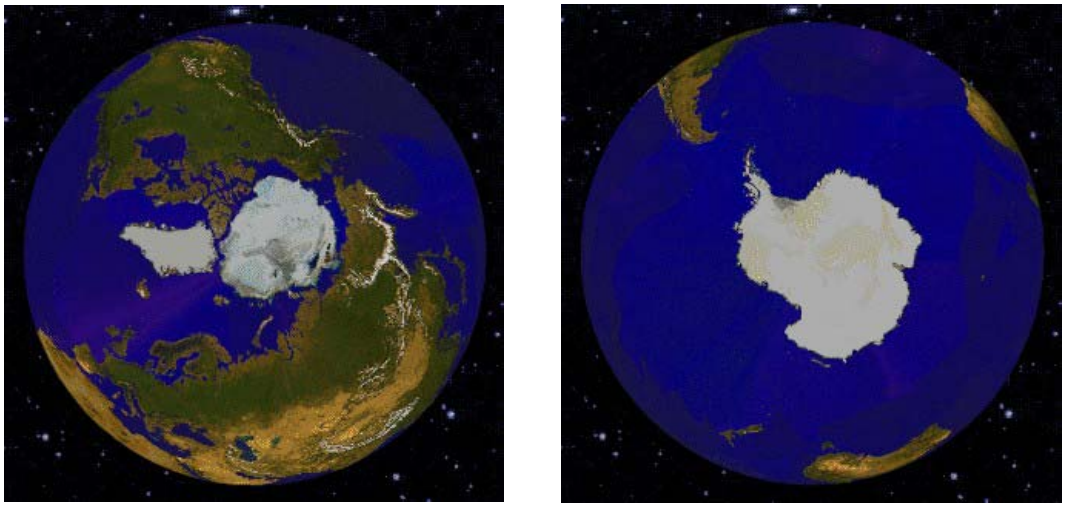

Figura 3. Vista del Hemisferio Norte (Izquierda) y Sur (Derecha). Nótese el predominio de masa continental en el primero.

La Hidrosfera

La hidrosfera engloba la totalidad de las aguas del planeta, incluidos los océanos, mares, lagos, ríos y las aguas subterráneas. Este elemento juega un papel fundamental al posibilitar la existencia de vida sobre la Tierra, pero su cada vez mayor nivel de alteración puede convertir el agua de un medio necesario para la vida en un mecanismo de destrucción de la vida animal y vegetal.

El agua salada: océanos y mares

El agua salada ocupa el 71% de la superficie de la Tierra y se distribuye en los siguientes océanos:

El océano Pacífico, el de mayor extensión, representa la tercera parte de la superficie de todo el planeta. Se sitúa entre el continente americano y Asia y Oceanía.
El océano Atlántico ocupa el segundo lugar en extensión. Se sitúa entre América y los continentes europeo y africano.

El océano Índico es el de menor extensión. Queda delimitado por Asia al Norte, África al Oeste y Oceanía al Este.

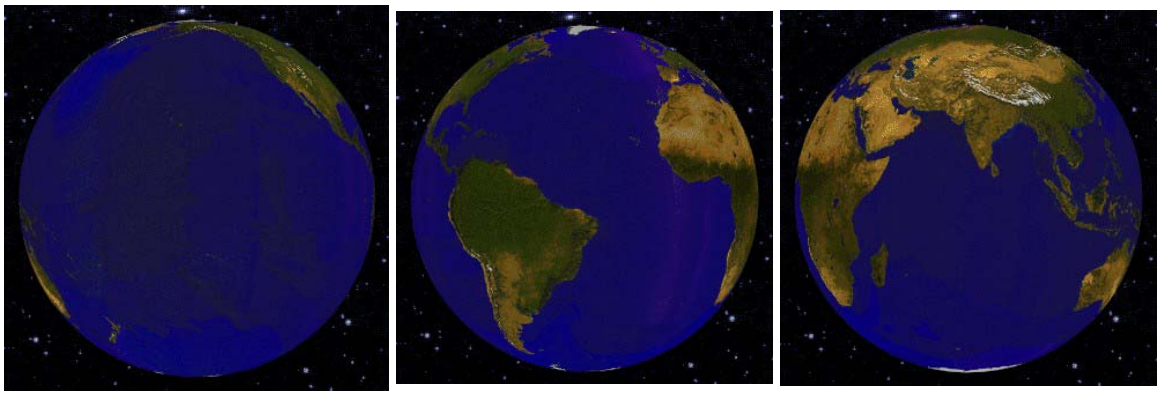

Figura 4. De izquierda a derecha, Océano Pacífico, Atlántico e Indico.

El océano Glacial Ártico se halla situado alrededor del Polo Norte y está cubierto por un inmenso casquete de hielo permanente.

El océano Glacial Antártico rodea la Antártida y se sitúa al Sur de los océanos Pacífico, Atlántico e Índico.

Los márgenes de los océanos cercanos a las costas, más o menos aislados por la existencia de islas o por penetrar hacia el interior de los continentes, suelen recibir el nombre de mares.

El agua dulce

El agua dulce, que representa solamente el 3% del agua total del planeta, se localiza en los continentes y en los Polos. En forma líquida en ríos, lagos y acuíferos subterráneos y en forma de nieve y hielo en los glaciares de las cimas más altas de la Tierra y en las enormes masas de hielo acumuladas entorno al Polo Norte y sobre la Antártida.

La Atmósfera

La Tierra está rodeada por una envoltura gaseosa llamada atmósfera, que es imprescindible para la existencia de vida, pero su contaminación por la actividad humana puede provocar cambios que repercutan en ella de forma definitiva.
La atmósfera tiene un grosor aproximado de 1.000 km. y se divide en capas de grosor y características distintas:

La troposfera es la capa inferior que se halla en contacto con la superficie de la Tierra y alcanza un grosor de unos 10 km. Hace posible la existencia de plantas y animales, ya que en su composición se encuentran la mayor parte de los gases que estos seres necesitan para vivir. Además, aquí ocurren todos los fenómenos meteorológicos y actúa de regulador de la temperatura del planeta, ya que el denominado efecto invernadero hace que la temperatura no llegue a valores extremos ni aumente o disminuya bruscamente, al ser absorbido el calor por las partículas de vapor de agua de las nubes.

La estratosfera es la capa intermedia, situada entre los 10 y los 80 km. En la estratosfera la temperatura aumenta y el aire se enrarece hasta tal punto que los seres vivos no podrían sobrevivir en ella. Sin embargo es fundamental por tener la función de filtro de las radiaciones solares ultravioleta, gracias a la existencia en ella de la denominada capa de ozono.

La ionosfera es la capa superior y la de mayores dimensiones, en ella el aire se enrarece cada vez más y la temperatura aumenta considerablemente. Es fundamental porque provoca la desintegración de los meteoritos que llegan a ella desde el espacio.

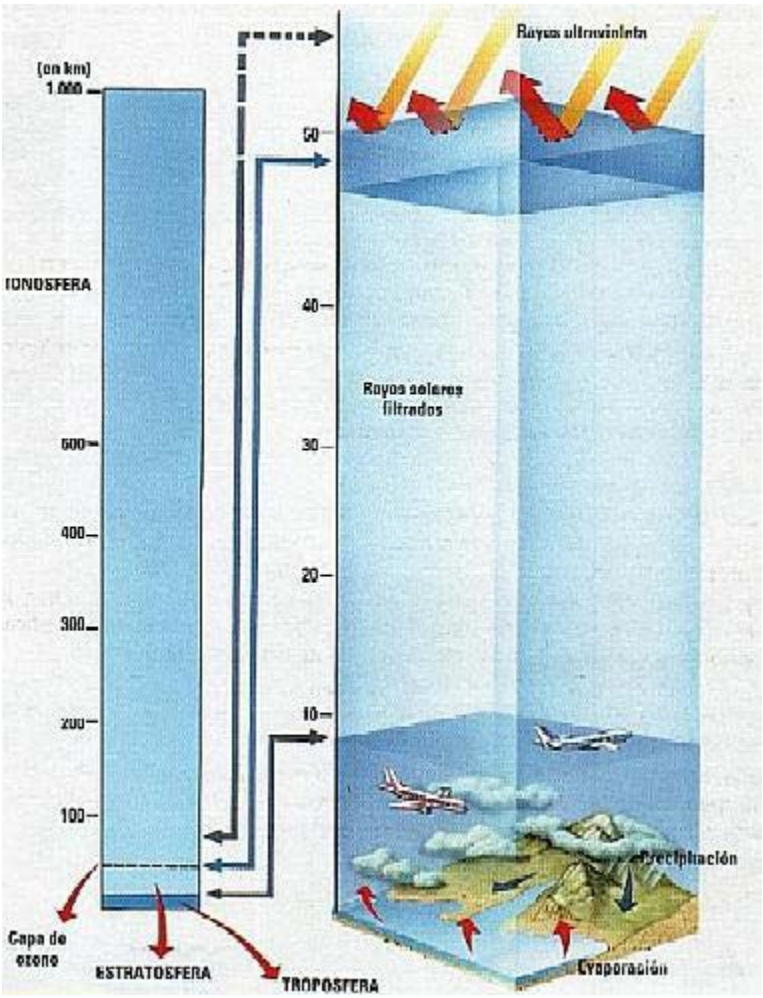

Figura 5. Capas de la atmósfera.

LA EDAD DE LA TIERRA Y EL ORIGEN DE LA VIDA

LA DEFINICIÓN DEL TIEMPO GEOLÓGICO

La geología histórica es la rama de la geología que estudia las transformaciones que ha sufrido la Tierra desde su formación, hace unos 4.600 millones de años, hasta el presente. Para establecer un marco temporal absoluto, los geólogos han desarrollado una cronología a escala planetaria dividida en eones, eras, sistemas o períodos, épocas o series y edades o pisos. Esta escala se basa en la estratigrafía, esto es, en el estudio e interpretación de los estratos, apoyada en los grandes eventos biológicos y geológicos. La Comisión Internacional de Estratigrafía se encarga de darle una edad absoluta en Millones de años a cada una de estas unidades de tiempo haciendo una conjugación de los eventos biológicos y geológicos con dataciones radiométricas y reversiones paleomagnéticas.

El tiempo relativo se basa en el siguiente principio: "un estrato que esté por encima de otro es más joven", esto se conoce como la Ley de Superimposición de Estratos. De esta manera es muy útil definir su posición en el tiempo geológico sin necesidad de conocer exactamente su edad en Millones de años.

Las siguientes son las unidades definidas para datar el Tiempo Absoluto:

Rango	Unidad de Tiempo Geológico	Descripción
1er orden	Eon	Es la division de tiempo más larga, que abarca varios cientos o miles de millones de años. Originalmente sólo existían dos eones: el Precámbrico y el Fanerozoico, pero ahora hay una tendencia a dividir el precámbrico en los eones Hadeano, Arcaico y Proterozoico.
2o orden	Era	La era generalmente está formada por varias decenas a cientos de millones de años, y se denomina por formas de vida distintivas: El Paleozoico es la era de los invertebrados primitivos, el Mesozoico es la era de los reptiles, y el Cenozoico es la era de los mamíferos.
3er orden	Periodo	Es el término más usado en la nomenclatura geológica, usualmente abarca de 30 a 80 millones de años (a excepción del cuaternario). Está representado por algún evento geológico o biológico importante.
4o orden	Epoca	Es una subdivision del periodo, y se denomina de acuerdo a una serie estratigráfica.
5o Orden	Edad	Usualmente dura entre 5 y 10 millones de años, y registra muy bien la evolución de la vida. Es normalmente la unidad de mayor resolución que se trabaja.
6o Orden	Cron	Es la division más pequeña, generalmente de un millón de años o menos, y usualmente determinado por biozonas, por tanto de difícil correlación global.

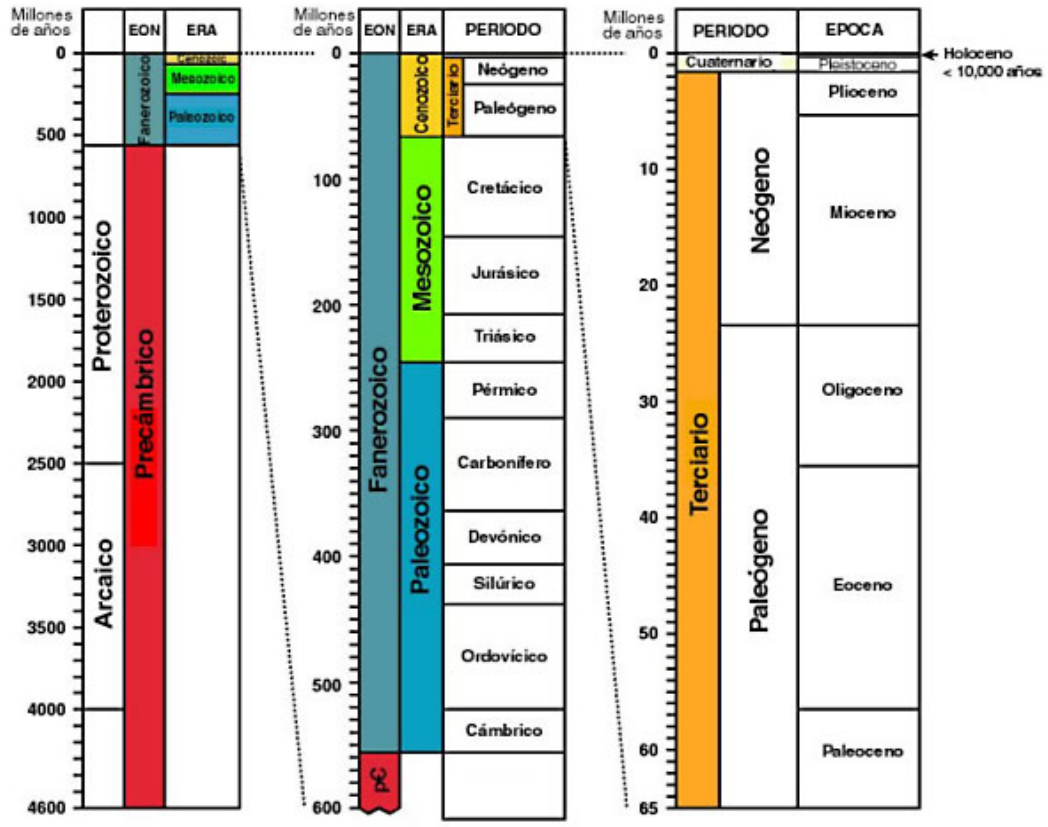

Figura 6. Escala general de tiempo Geológico.

HISTORIA DE LA TIERRA Y LA VIDA

El Hadeano (4560-3800 Ma)

Este Eon no se ha reconocido en el registro geológico, sin embargo, se sugirió por las rocas lunares. Durante el Hadeano se formó el Sistema Solar por la coagulación y contracción gravitacional de una nube de polvo y gas alrededor del sol. Las partículas alredor del sol fueron formando pequeños planetas, y las continuas colisiones sumadas al calor producido por las fusiones nucleares fueron dando origen a los planetas que conocemos en la actualidad. La Luna se formó 45 Ma después de los planetas internos debido a una colisión de la Tierra con un gran planetoide conocido como Theia. Rocas de esta edad sólo se conocen en La Luna y en una localidad del oeste de Australia (Jack Hills). Durante el Hadeano también se formó la atmósfera primitiva y los primeros océanos.

Eon	Piso	Inicio (Ma)	Duración (Ma)	Eventos
Hadean	Imbriano Temprano	3,900	100	Formación de la corteza arcáica
	Nectariano	3,950	50	Ultimo bombardeo de asteroides
	"Ryderiano"	4500	550	Diferenciación del núcleo, manto y protocorteza
	Críptico	4560	~60	Acreción de la Tierra al disco solar; formación de la Luna

El Arcaico (3800-2500 Ma)

Este fue el periodo de la mayor formación de continentes, a partir de rocas más livianas que flotaban y se acrecionaban unas con otrsa a manera de islas. 70% de la masa continental se formó en esta etapa. Algunas de estas antiguas rocas auns e conservan en grandes masas conocidas como escudos continentales. Durante este periodo se formaron los primeros microorganismos sintetizadores de hidrógeno y metano. Posteriormente se formaron las primeras plantas, similares a las algas verdeazules de la actualidad. Los crecimientos de algas y bacterias formaron un registro en las rocas conocidas como estromatolitos.

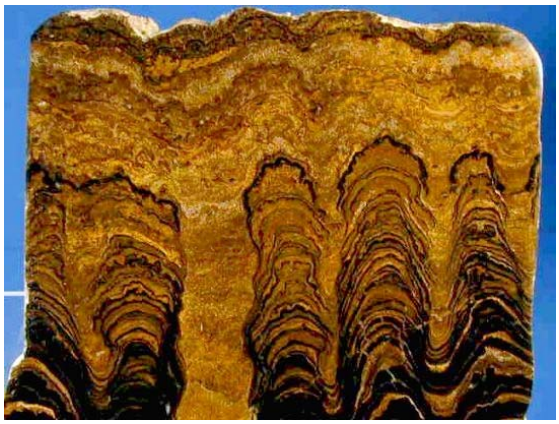

Figura 7. Estromatolitos formados por algas verdeazules.

EON	ERA	Duración (Ma)	Eventos
Arqueano	Neoarqueano	2800 - 2500 mya	Primeros escudos continentales
	Mesoarqueano	3200 - 2800 mya	Primera evidencia aceptada de registro fósil. Primeras formaciones de hierro bandeado.
	Paleoarqueano	3600 - 3200 mya	Formación de corteza estable.
	Eoarqueano	~3800 - 3600 mya	Supuesta evidencia geoquímica de la vida (no aceptada oficialmente aun)

El Proterozoico (2500-542 Ma)

Este eon fue el inicio de la actividad continental tal y como se conoce en la actualidad, y la tectónica de placas comenzó a gobernar la configuración de los continentes. Se formaron los primeros organismos unicelulares conocidos como fauna Eucariana (plantas, hongos y bacterias). Muchos de estos no sobrevivieron a la explosión cámbrica. Durante el proterozoico existieron los acritarcos, que son estructuras con pared orgánica, muy similares a los aromáticos policíclicos.
Se creó un supercontinente llamado Rodinia, que posteriormente se separó dando origen a las dos grandes masas: Laurentia y Gondwana.

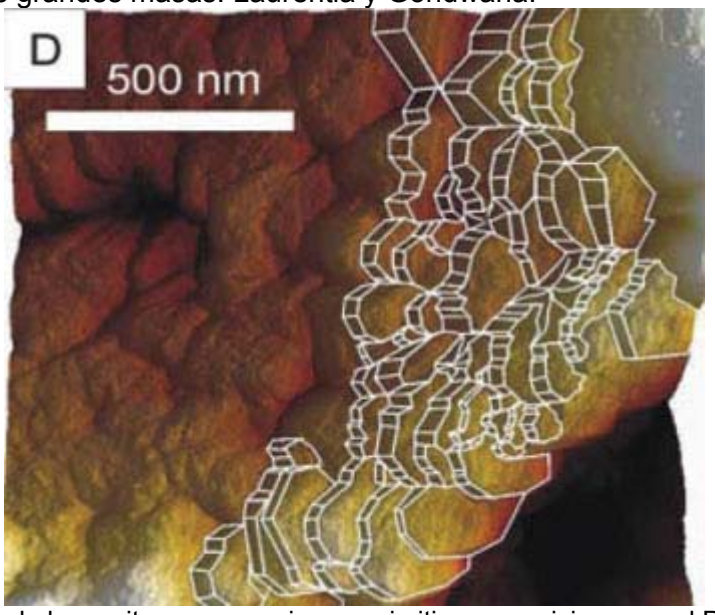

Figura 8. Imagen de los acritarcos, organismos primitivos que vivieron en el Proterozoico.

El Fanerozoico (542-0 Ma)

El Fanerozoico inicia con la formación de vida multicelular, en especial los animales. En realidad la palabra Fanerozoico significa la revelación de la vida.

Eon	Era	Periodo	Inicio (Ma) ICS	Duración (Ma) ICS
Fanerozoico	Cenozoico	Neogeno	23.0	23.0
		Paleogeno	65.5	42.5
	Mesozoico	Cretáceo	146	80.5
		Jurásico	200	54
		Triásico	251	51
	Paleozoico	Pérmico	299	48
		Carbonífero	359	60
		Devónico	416	57
		Silúrico	444	28
		Ordovícico	488	44
		Cámbrico	542	54

El Paleozoico (era de la vida antigua), está representado por la abundancia de invertebrados, peces y tetrápodos (antiguos reptiles). Está representado por los siguientes periodos:

Período cámbrico (542 a 488 millones de años). Una explosión de vida pobló los mares, pero la tierra firme permaneció estéril. Toda la vida animal era invertebrada, y los animales más comunes eran los artrópodos llamados trilobites (extintos en la actualidad) con miles de especies diferentes. Colisiones múltiples entre las placas de la corteza terrestre crearon el primer supercontinente, llamado Gondwana.

Periodo ordovícico (488 a 444 millones de años). El predecesor del océano Atlántico actual empezó a contraerse mientras que los continentes de esa época se acercaban unos a otros. Los trilobites seguían siendo abundantes; importantes grupos hicieron su primera aparición, entre ellos estaban los corales, los crinoideos, los briozoos y los pelecípodos. Surgieron también peces con escudo óseo externo y sin mandíbula, que son los primeros vertebrados conocidos; sus fósiles se encuentran en lechos de antiguos estuarios de América del Norte.

Periodo silúrico (444 a 416 millones de años). La vida se aventuró en tierra bajo la forma de plantas simples llamadas psilofitas, que tenían un sistema vascular para la circulación de agua, y de animales parecidos a los escorpiones, parientes de los artrópodos marinos, extintos en la actualidad, llamados euriptéridos. La cantidad y la variedad de trilobites disminuyeron, pero los mares abundaban en corales, en cefalópodos y en peces mandibulados.

Periodo devónico (416 a 359 millones de años). Este periodo se conoce también como la edad de los peces, por la abundancia de sus fósiles entre las rocas de este periodo. Los peces se adaptaron tanto al agua dulce como al agua salada. Entre ellos había algunos con escudo óseo externo, con o sin mandíbula, tiburones

primitivos (aún existe una subespecie de los tiburones de esta época) y peces óseos a partir de los cuales evolucionaron los anfibios. En las zonas de tierra, se hallaban muchos helechos gigantes.

Periodo carbonífero (359 a 299 millones de años). Los trilobites estaban casi extinguidos, pero los corales, los crinoideos y los braquiópodos eran abundantes, así como todos los grupos de moluscos. Los climas húmedos y cálidos fomentaron la aparición de bosques exuberantes en los pantanales, que dieron lugar a los principales yacimientos de carbón que existen en la actualidad. Las plantas dominantes eran los licopodios con forma de árbol, los equisetos, los helechos y unas plantas extintas llamadas pteridospermas o semillas de helecho. Los anfibios se extendieron y dieron nacimiento a los reptiles, primeros vertebrados que vivían sólo en tierra. Aparecieron también insectos alados como las libélulas.

Periodo pérmico (290 a 245 millones de años). Las zonas de tierra se unieron en un único continente llamado Pangea, y en la región que correspondía con América del Norte se formaron los Apalaches. En el hemisferio norte aparecieron plantas semejantes a las palmeras y coníferas que sustituyeron a los bosques formadores de carbón. Los cambios en el medio, resultado de la redistribución de tierra y agua, provocaron la mayor extinción de todos los tiempos. Los trilobites y muchos peces y corales desaparecieron cuando terminó el paleozoico.

Figura 9. Formas de vida del Paleozoico: Corales, trilobites, gasterópodos y braquiópodos.

El Mesozoico (era de la vida media), está caracterizado por la abundancia de reptiles. Está representado por los siguientes periodos:

Periodo triásico (251 a 199.6 millones de años). El principio de la era mesozoica quedó marcado por la reaparición de Gondwana cuando Pangea se dividió en los supercontinentes del Norte (Laurasia) y del Sur (Gondwana). Las formas de vida cambiaron considerablemente en esta era, conocida como la edad de los reptiles. Aparecieron nuevas familias de pteridospermas, y las coníferas y los cicadofitos se convirtieron en los mayores grupos florales, junto a los ginkgos y a otros géneros. Surgieron reptiles, como los dinosaurios y las tortugas, además de los mamíferos.

Periodo jurásico (199.6 a 145.5 millones de años). Al desplazarse Gondwana, el norte del océano Atlántico se ensanchaba y nacía el Atlántico sur. Los dinosaurios dominaban en tierra, mientras crecía el número de reptiles marinos, como los ictiosaurios y los plesiosaurios. Aparecieron los pájaros primitivos y los corales formadores de arrecifes crecían en las aguas poco profundas de las costas. Entre los artrópodos evolucionaron animales semejantes a los cangrejos y a las langostas.

Periodo cretácico (145.5 a 65.5 millones de años). Los dinosaurios prosperaron y evolucionaron hacia formas más especializadas, para desaparecer de forma brusca al final de este periodo, junto a muchas otras formas de vida. Las teorías para explicar esta extinción masiva tienen en la actualidad un gran interés científico. Los cambios florales de este periodo fueron los más notables de los ocurridos en la historia terrestre. Las gimnospermas estaban extendidas, pero al final del periodo aparecieron las angiospermas (plantas con flores).

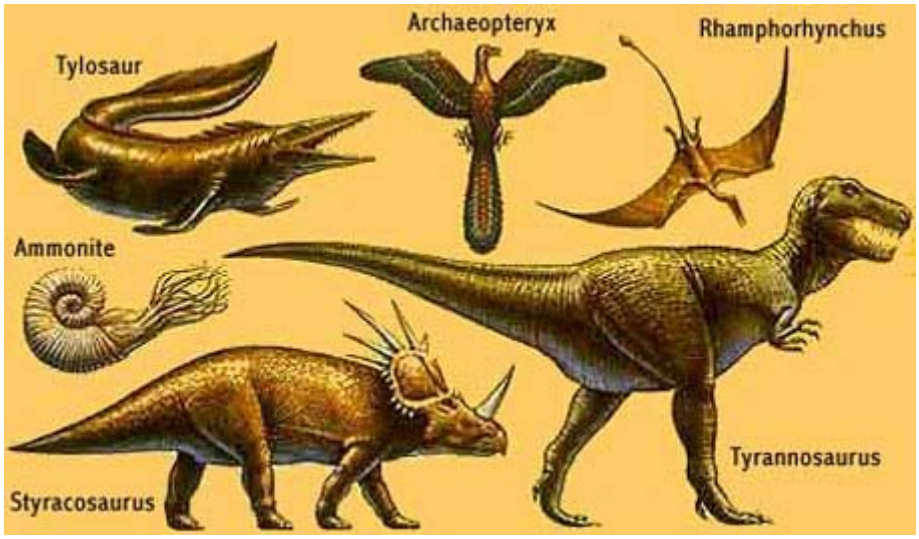

Figura 10. Formas de vida del Mesozoico: Amonites y reptiles marinos y terrestres, primeras aves.

El Cenozoico, o era de los mamíferos, se desarrolló desde los 65.5 Ma hasta el reciente. Durante el cenozoico, las formas de vida de la tierra y del mar se hicieron más parecidas a las existentes en la actualidad. Durante este periodo tiene lugar el levantamiento de la cordillera de los Andes. La hierba era más prominente, y esto provocó cambios en la dentición de los animales herbívoros. Al haber desaparecido la mayoría de los reptiles dominantes al final del cretácico, el cenozoico fue la edad de los mamíferos. De esta forma, en la época del eoceno se desarrollaron nuevos grupos de mamíferos, como ciertos animales pequeños parecidos a los caballos actuales, rinocerontes, tapires, rumiantes, ballenas y ancestros de los elefantes. En el oligoceno aparecieron miembros de las familias de los gatos y de los perros, así como algunas especies de monos. En el mioceno los marsupiales eran numerosos, y surgieron los antropoides (semejantes a los humanos). En el Plioceno, los mamíferos con placenta alcanzaron su apogeo, en número y diversidad de especies, extendiéndose hasta el Pleistoceno.
El conocido periodo cuaternario (1.8 Ma-Reciente) está conformado por el Pleistoceno y el Holoceno. Actualmente estas dos épocas se incluyen dentro del Periodo Neogeno, y por eso ya no se usa el término cuaternario. Durante este tiempo, capas de hielo continentales intermitentes cubrieron gran parte del hemisferio norte. Los restos fósiles ponen de manifiesto que hubo muchos tipos de

prehumanos primitivos en el centro y sur de África, en China y en Java, en el pleistoceno temprano y medio; pero los seres humanos modernos (Homo sapiens) no surgieron hasta el final del pleistoceno. Más tarde, en este periodo, los humanos cruzaron al Nuevo Mundo a través del estrecho de Bering. Las capas de hielo retrocedieron al final y empezó la época reciente, el holoceno. Se inició el descenso y el retroceso continental desde el estrecho de Magallanes hasta las Antillas y se formaron ríos y lagunas.

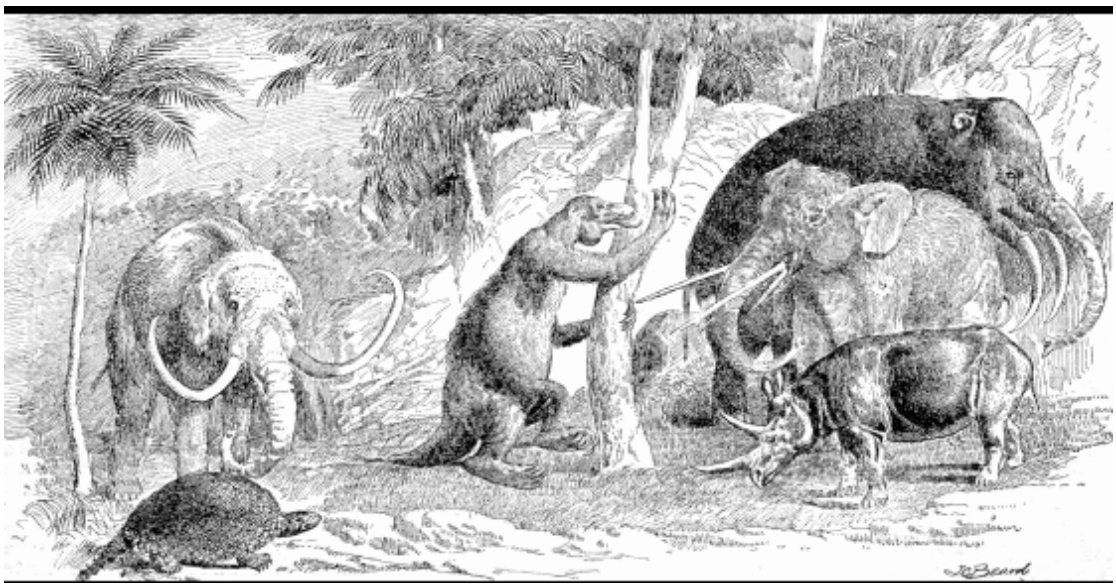

Figura 11. Formas de vida del Cenozoico: Grandes mamíferos principalmente. En el último millón de años apareció el hombre.

LA TECTÓNICA DE PLACAS

LA DERIVA CONTINENTAL

La teoría de las placas tectónicas es un concepto relativamente nuevo en la geología, desarrollado durante la década de los 60. Sin embargo, era una idea que rondaba en la cabeza de algunos científicos mucho tiempo atras. En 1596, el Geógrafo holandés Abraham Ortelius sugirió que América se había separado de Africa por terremotos y erupciones volcánicas. En 1912, el geógrafo Alfred Wegener publicó la teoría de la Deriva Continental, donde sugería que hace unos 200 Ma los continentes se habían empezado a separar. Esta teoría revolucionó la forma de ver la Tierra, pues antes se pensaba que todos los continentes se encontraban fijos en la misma posición durante todo el tiempo geológico. Wegener pasó toda su vida reuniendo información para comprobar su teoría, y murió en 1930. Tres décadas después, gracias a evidencia paleontológica y paleomagnética se comprobaría que esta teoría era cierta, y ahora es la más aceptada en los modelos geodinámicos.

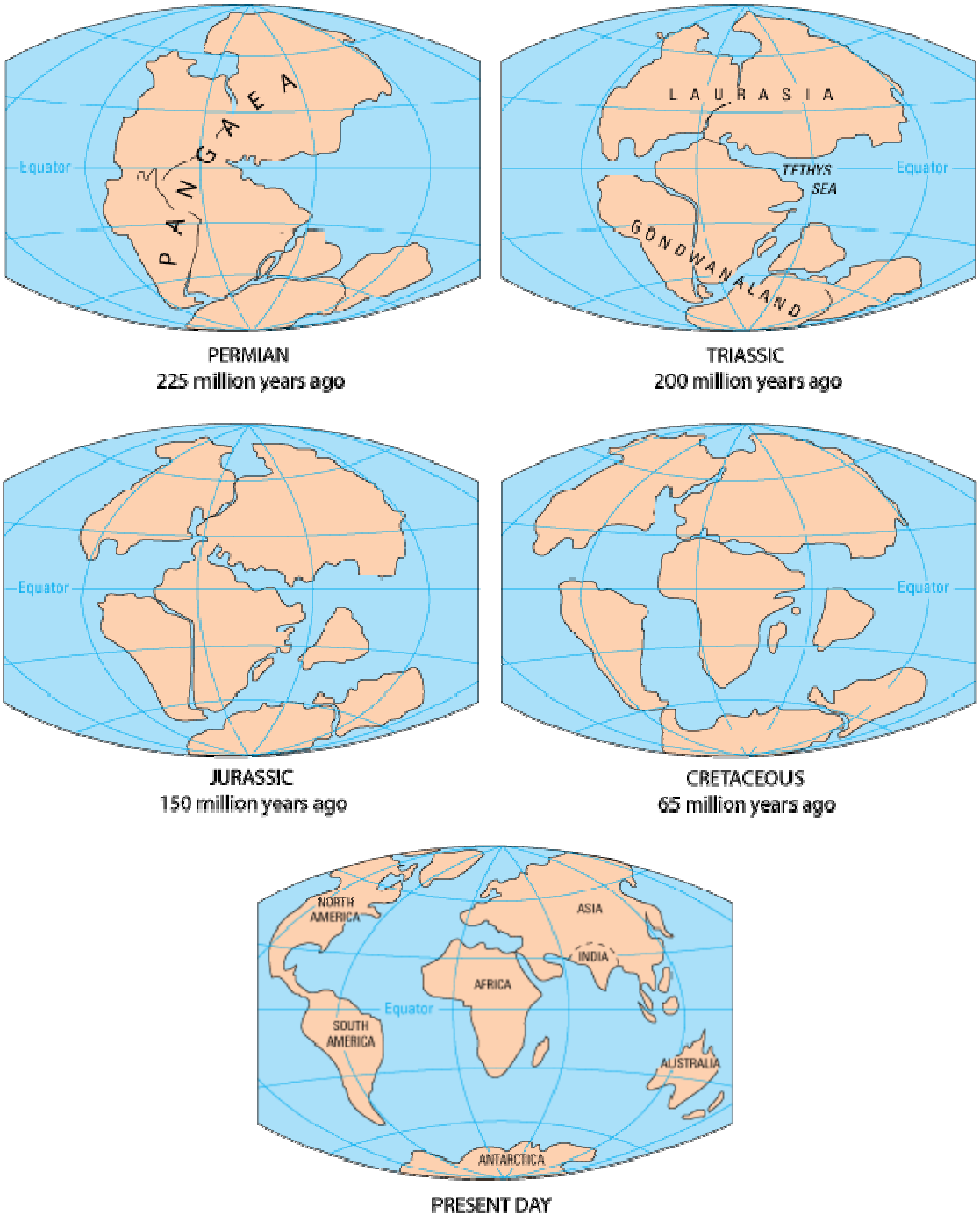

Figura 12. Esquemas paleogeográficos que indican la evolución de los continentes desde el rompimiento de Pangea hasta el día de hoy.

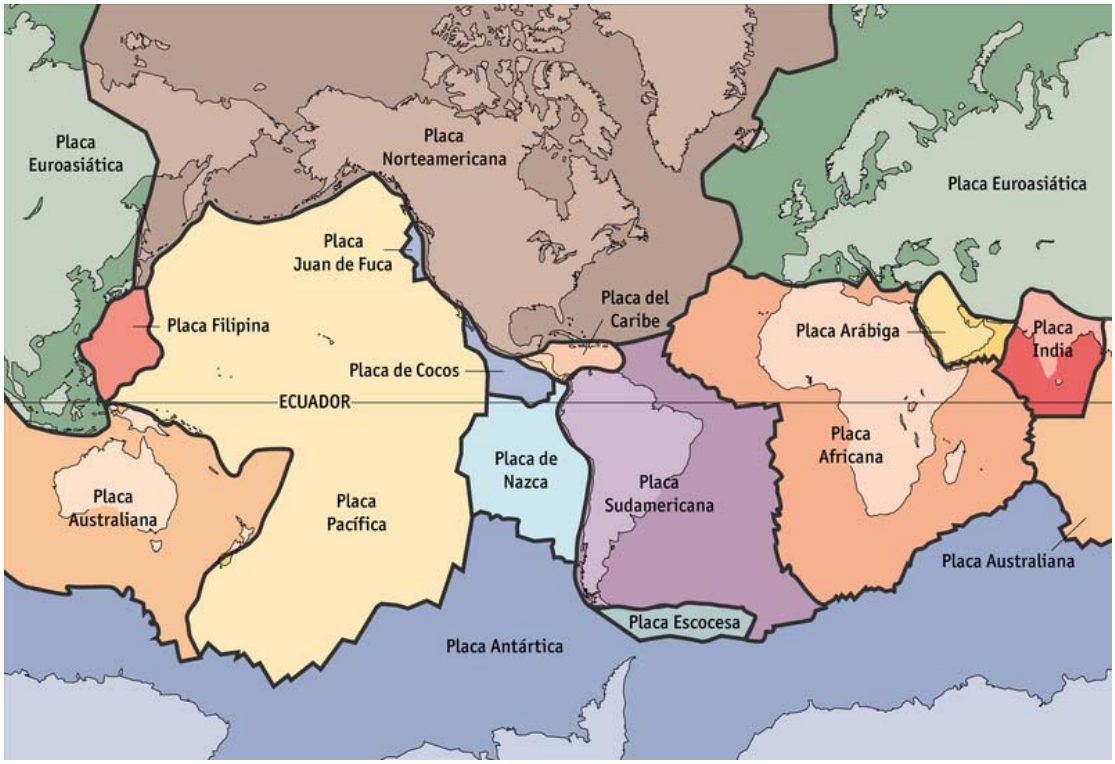

Figura 13. Principales placas tectónicas.

LAS PLACAS TECTÓNICAS

Una placa tectónica es una porción de la litosfera, de unos 100Km de espesor, que reposa sobre la astenosfera, una zona de la Tierra compuesta de roca fundida, fuente principal de los volcanes. La astenosfera, como mecanismo de difusión del calor interno de la Tierra presenta una convección. Este movimiento circular causa el movimiento de las placas, las cuales dependiendo de su dirección pueden estar convergentes, divergentes o moverse lateralmente. En total existen 7 placas mayores y por lo menos unas 12 placas menores (ver fig. 13). La edad máxima de la corteza oceánica a lo largo de las placas tectónicas es de 200 Ma.

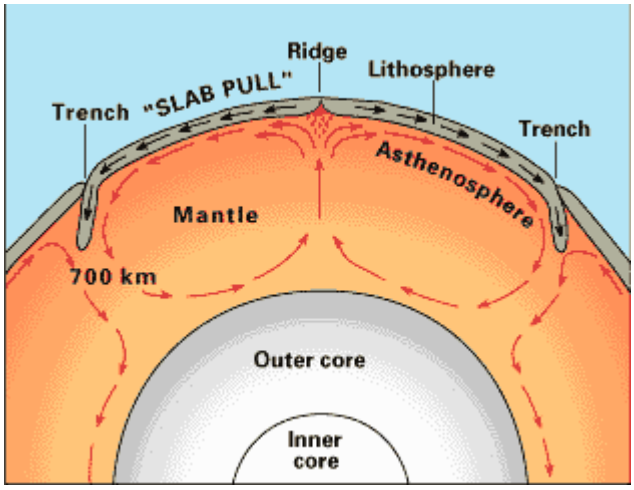

Figura 14. Esquema que representa el movimiento de las placas tectónicas debido a la convección de la astenosfera.

Evidencias que soportan la tectónica de placas

Expansión del suelo oceánico: Durante las exploraciones oceánicas desarrolladas durante la primera guerra mundial se descubrió que el océano era más rugoso de lo que se pensaba. Posteriormente, en 1947 el desarrollo de sonares para detectar submarinos permitió estudiar más el océano y se encontró que la capa sedimentaria oceánica era muy delgada para ser tan vieja, y en 1950 se cartografió la dorsal oceánica del Atlántico, una cadena montañosa submarina de más de 50.000Km de largo y 800Km de ancho. Además, con alturas promedio de 4500m sobre el sustrato marino. Por medio de estudios paleomagnéticos se descubrió que a lo largo de esta dorsal existían reversiones del campo magnético terrestre, y que eran totalmente simétricas a lado y lado de la dorsal, como si se tratase de un espejo.

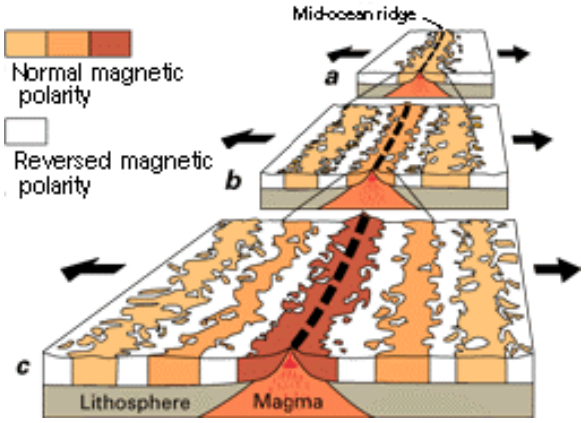

Figura 15. Esquema que representa las reversiones de la polaridad magnética.

Esta nueva evidencia llevó a los científicos en 1961 a crear la teoría de la expansión del piso oceánico, que consistía en que el magma salía de las dorsales y se iba alejando a medida que más magma iba creciendo. Según Harry Hess, para que el mundo no creciera indefinidamente habría que reciclar todo ese magma creado. De esta manera, muy lejos de las dorsales, el magma volvería a descender hasta el manto, continuando el ciclo. La industria petrolera trajo consigo múltiples datos paleontológicos e isotópicos que afirmaron esta teoría.

La concentración de los Terremotos: Durante los años 20, los sismógrafos registraban concentraciones de sismos paralelas a las fosas oceánicas, con ángulos que variaban entre 40 y 60º. Estas zonas se conocieron después como las zonas de Wadati-Benioff, en honor a los sismólogos que las estudiaron. En 1960 se instalaron sismógrafos globales con el fin de monitorear detonaciones nucleares submarinas, y se descubrió que en las zonas donde la corteza oceánica era reciclada se concentraba la mayor cantidad de terremotos. Este cinturón se denominó como el "anillo de fuego", por la concentracion de volcanes a su alrededor.

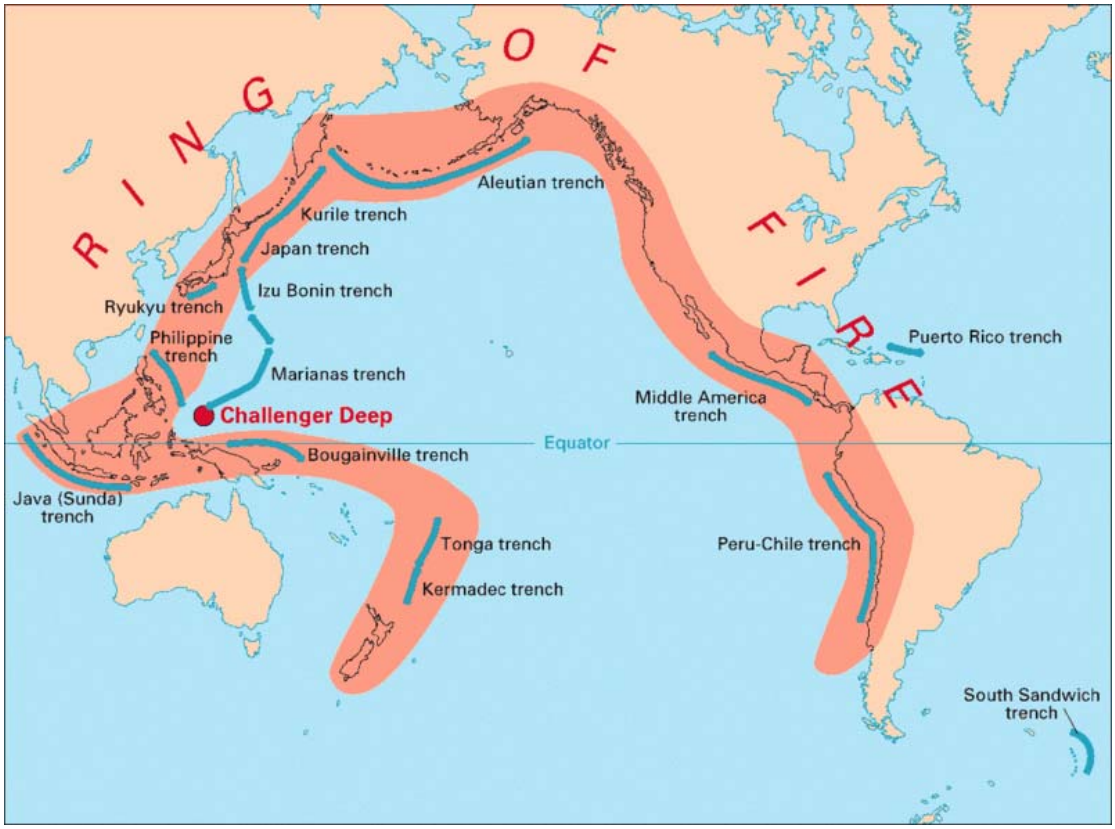

Figura 16. Anillo de fuego, el cual coincide con las zonas de reciclaje de corteza.

Forma de los continentes: Esta fue la primera evidencia que permitió a los científicos postular la teoría de la deriva continental, y se debe a las similitudes de los bordes de los continentes de Suramérica y Africa.

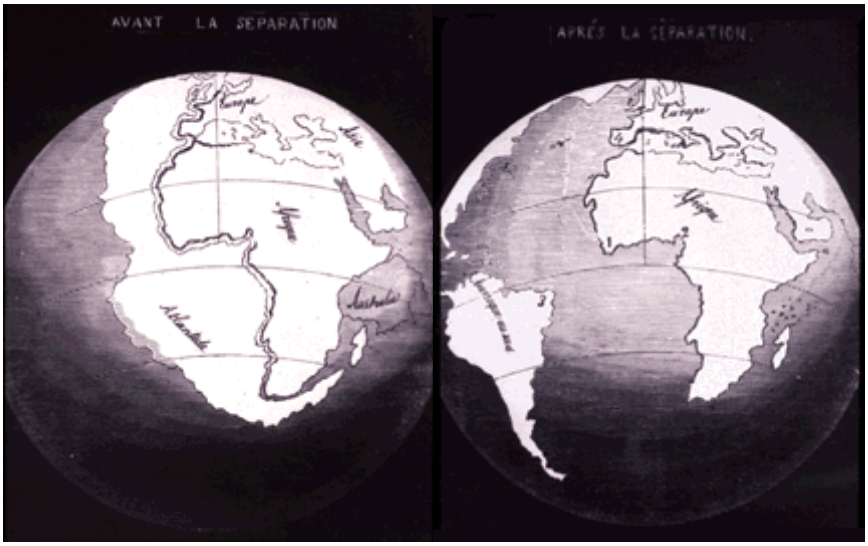

Figura 17. Mapa geográfico de 1858 realizado por A. Pellegrini donde muestra la similitud de la forma de los continentes y cómo pudieron estar unidos inicialmente.

Evidencia Geológica y Paleontológica: Durante diferentes periodos geológicos se ha encontrado que zonas tropicales tienen depósitos glaciares, se han encontrado carbones tropicales en latitudes medias, y fósiles similares entre continentes separados por océanos, como en el caso de Africa y Suramérica. Curiosamente,

estos fósiles son iguales hasta el Triásico, y a partir del Jurásico empiezan a mostrar características evolutivas diferentes, indicando la edad de separación de estas dos masas continentales. Los estratos rocosos y la posición de los cratones continentales también presentan una buena correlación al unir estos dos continentes. La evidencia más famosa es el crecimiento de la flora Glossopteris, el cual sólo se encuentra en el territorio de Gondwana.

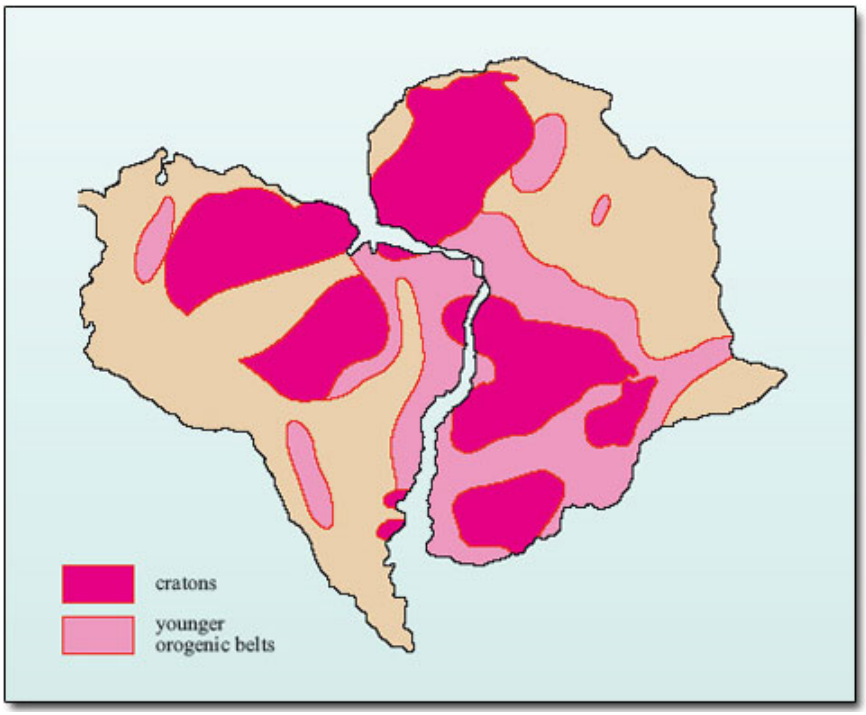

Figura 18. Reconstrucción de la posición de los cratones continentales. Nótese la buena correlación entre Africa y Suramérica.